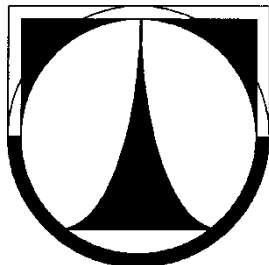


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra materiálu



Geopolymerní směsi pro tepelné izolace

Geopolymer mixtures for thermal insulation

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Martin Štefan

2012

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ
KATEDRA MATERIÁLU

Studijní program: B2341 Strojírenství

Studijní obor: 3911R018 Materiály a technologie

Zaměření: Materiálové inženýrství

Geopolymerní směsi pro tepelné izolace

Geopolymer mixtures for thermal insulation

KMT – B – 186

Martin Štefan

Vedoucí práce: prof. Ing. Petr Louda, CSc.

Konzultant: Ing. Nguyen Thang Xiem

Počet stran: 55

Počet tabulek: 1

Počet obrázků: 50

Počet grafů: -

Počet příloh: -

Datum 06.01.2012

Místo pro vložení originálního zadání (BP)

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum 06. 01. 2012

Podpis

ANOTACE

Jméno:	Martin Štefan
Obor:	3911 R 018 Materiály a technologie
Zaměření:	Materiálové inženýrství
Téma práce:	Geopolymerní směsi pro tepelné izolace
Číslo bakalářské práce:	KMT - BP - 186
Vedoucí bakalářské práce:	prof. ing. Petr Louda, CSc.
Konzultant bakalářské práce:	ing. Xiem Thang Nguyen

Abstrakt

Předmětem této bakalářské práce je využití geopolymerních směsí jako izolačních nebo ochranných prvků při aplikaci na dřevo. Geopolymery nejsou ještě zcela známé, jelikož dosavadní výzkum byl především v oblasti mechanických vlastností. Veškerá měření v této práci jsou původní. Tato práce má za cíl vymezit základní tepelně izolační vlastnosti geopolymerních směsí a naznačit jejich případné uplatnění jako ohnivzdorné ochrany ve stavebnictví, strojírenství, atd.

Teoretická část pojednává obecně o geopolymerech, jejich historii, vlastnostech a použití. Dále se zabývá surovinami, které jsou použity při přípravě vzorků. V teoretické části nelze opomenout ani vlastnosti dřeva při hoření a jeho obecná ochrany.

V experimentální části je popsán způsob přípravy vzorků, metoda měření, postup vyhodnocení naměřených hodnot a následné porovnání výsledků.

Klíčová slova: Geopolymerní směs, alkalická aktivace, dřevo, tepelné namáhání, ohnivzdornost

ANNOTATION

Name: Martin Štefan

Specialization: 3911 R 018 Materials and technologies

Focusing: Material engineering

Theme: Geopolymer mixtures for thermal insulation

Number of BSC work: KMT - BP - 186

Leader of BSC work: prof. ing. Petr Louda, CSc.

Consulter: ing. Xiem Thang Nguyen

Abstract:

The subject of this thesis is the use of geopolymer mixtures as insulating or protective elements when applied to wood. Geopolymers are not yet fully known, since previous research has been mostly in the field of mechanical properties. All measurements in this work are original. This work aims to define the basic thermal-insulating properties of geopolymers and indicate their potential application as fireproof protection in construction, engineering, etc.

The theoretical part discusses generally geopolymers, their history, properties and uses. It also deals with materials that are used in the preparation of samples. The theoretical part can't forget the burning properties of wood and general protection.

In the experimental section describes the method of sample preparation, method of measurement, process evaluation of the measured values and then comparing the results.

Key words: Geopolymer mixtures, alkaline activation, wood, thermal strain, fire resistance

Touto cestou bych rád poděkovala vedoucímu bakalářské práce panu prof. ing. Petru Loudovi, CSc., paní doc. Ing. Doře Kroisové Ph.D. a konzultantu panu ing. Xiem Thang Nguyen, za odbornou pomoc při zpracování tématu, ochotu a množství poskytnutých rad.

Obsah

1	Úvod	10
2	TEORETICKÁ ČÁST	11
2.1	Charakteristika geopolymérů	11
2.1.1	Historie geopolymérů	11
2.1.2	Novodobé výzkumy v oblasti geopolymérů	12
2.1.3	Struktura geopolymérů	13
2.1.4	Vlastnosti geopolymérů	14
2.1.5	Suroviny pro přípravu geopolymérů	14
2.1.6	Mechanismus geopolymerace	16
2.2	Hořlavost dřeva	17
2.2.1	Mechanismus působení tepelné energie na dřevo	17
2.2.2	Ochrana proti ohni	19
2.2.3	Základní pojmy	20
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	21
3.1	Použité materiály	21
3.2	Použité přístroje	22
3.3	Příprava zkušebních vzorků	23
3.4	Příprava směsí	24
3.4.1	Příprava směsí pro testování ohnivzdornosti	24
4	VÝSLEDKY A DISKUZE	26
4.1	Testování ohnivzdornosti	26
4.1.1	Dřevotřísková deska bez povrchové úpravy	26
4.1.2	Dřevotřísková deska s povrchovou úpravou z geopolymerní směsi s obsahem 60 % skleněné drtě	28
4.1.3	Dřevotříska s povrchovou úpravou z geopolymerní směsi s obsahem 20 % popílku a 2 % skelného vlákna	31
4.1.4	Dřevotřísková deska s povrchovou úpravou z geopolymerní směsi s obsahem 30 % siloxidu	34

4.1.5	Dubová deska bez povrchové úpravy	36
4.1.6	Dubová deska s povrchovou úpravou z geopolymerní směsi s obsahem 60 % skleněné drtě.....	38
4.1.7	Dubová deska s povrchovou úpravou z geopolymerní směsi s obsahem 20 % popílku a 2 % skelného vlákna.....	41
4.1.8	Smrková deska bez povrchové úpravy	44
4.1.9	Smrková deska s povrchovou úpravou ze směsi s obsahem 60 % skleněné drtě.....	46
4.1.10	Smrková deska s povrchovou úpravou ze směsi s obsahem 20 % popílku a 2 % skelného vlákna	49
5	ZÁVĚR	53
6	Seznam použité literatury	54

1 Úvod

Geopolymery umožňují různorodé uplatnění, jelikož nabízejí velké množství modifikací a dosažení jedinečných kombinací vlastností, díky nimž materiál přečká tisíciletí. Patří k nim především vysoká pevnost v tlaku a odolnost vůči kyselým dešťům, ohni i bakteriím. Pro svou extrémní odolnost mohou sloužit především jako vynikající izolace a stavební materiál. Díky odolnosti vůči vysokým teplotám (do 1000°C) jsou použitelné i tam, kde již nelze použít cement [5]. V porovnání s cementem výrazně šetří životní prostředí, protože při výrobě nevypouští do ovzduší oxid uhličitý. Proto geopolymery nabízejí východisko ze situace, která vzniká nárůstem lidské populace a s tím související zvyšující se spotřebou surovin, díky níž dochází k tenčení nerostných přírodních zdrojů.

Zatím se jeví jako utopie, že by byl například cement nahrazen geopolymery. V současnosti jim v tom brání poměrně vysoké výdaje na přípravu a ještě ne zcela probádané vlastnosti geopolymery.

Cílem mé bakalářské práce je otestovat ohnivzdornost několika vybraných geopolymerních směsí při aplikaci jako povrchové ochrany dřeva.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Charakteristika geopolymérů

V letech 1976 - 1979 navrhl Davidovits nový pojem geopolymér. Podle Davidovitsovy definice je geopolymér produkt, který vzniká anorganickou polykondenzací tzv. geopolymerací [1]. Geopolymery patří do skupiny alkalicky aktivovaných materiálů, které se pohybují na hranici mezi keramickými, skelnými materiály a klasickými hydratovanými anorganickými pojivy (cementy a hydraulická vápna) [2]. Jsou to materiály, které obsahují křemík, hliník a alkalický prvek jako sodík či draslík. V přírodě se podobné materiály vyskytují v krystalické podobě.

Geopolymery nevznikají geologickými procesy, ale jsou uměle připravené [3]. Název geopolymér hlavně popisuje způsob přípravy materiálu (GEOsyntéza) a pak využívá přirovnání výsledného produktu k běžně používanému materiálu, jakým jsou plasty (POLYMER) [4]. Geopolymery jsou na první pohled nerozeznatelné od kamene, ale svými vlastnostmi jej jednoznačně předčí. Nabízejí totiž úžasné možnosti modifikací a dosažení jedinečných kombinací vlastností, díky nimž materiál přečká tisíciletí. Patří k nim především vysoká pevnost v tlaku a odolnost vůči kyselým deštům, ohni i bakteriím [5].

2.1.1 Historie geopolymérů

V roce 1974 francouzský profesor chemie Joseph Davidovits přišel s objevem, že každý kámen se dá vytvořit uměle. Současně ho zaujala záhada egyptských pyramid natolik, aby se pokusil dokázat, že již před více než 4500 lety znalo lidstvo dosud nejdokonalejší stavební materiál na planetě Zemi. Nakonec dospěl k závěru, že Egypťané využili období záplav, svezli písek z nejbližšího okolí, napěchovali ho do forem (předem připravené dřevěné šalování), smísili s aktivními prostředky (vápenec, voda, jíl, soli). Nakonec vykonalo svou práci slunce, které změnilo směs v litý kámen. U egyptologů tehdy vyvolal doslova pobouření. Dnes vše nasvědčuje tomu, že měl pravdu. Odvážná hypotéza se opírá o náročné laboratorní zkoušky, například nukleární rezonancí, prokazující, že nerost, ze kterého jsou pyramidy postaveny, obsahuje vodu a pohlcuje záření. To se u přírodního kamene nemůže stát. Při zkoumání kamenů z pyramid byly také uvnitř hmoty nalezeny vlasy. A ještě něco. Když Davidovits pořídil průřez kvádrem z pyramidy, zjistil, že je ve spodní části

hustší než v horní. Profesor tak rozbil názor o využití jakýchsi ramp postavených v ostrém úhlu ke zvedání kamenných bloků [5].

Mezi další příklady využití alkalicky aktivovaných materiálů využívaných ve starých civilizacích lze uvést cihly používané na výstavbu zikkurat ve starověké Mezopotámii. Zikkuraty jsou stupňovité věže vysoké několik desítek metrů, mající několik teras nad sebou a na vrcholu schodiště vedoucí ke svatyni (nejznámější Mardukův zikkurat neboli Babylonská věž). Na jejich stavbu byly používány cihly, které se vyznačují výbornou trvanlivostí a při jejichž průzkumu byla zjištěna velká podobnost se střepem pálených cihel. Teorie pálení cihle je však zpochybňována a nabízí se vysvětlení použití geopolymerního materiálu, pro jehož tvorbu je v této lokalitě dostatek potřebných surovin na rozdíl od nedostatku paliva nutného pro výpal ohromného množství cihel. Teorii o použití geopolymerních materiálů podporuje i nález zuhelnatělých organických vláken v hmotě cihel [6].

2.1.2 Novodobé výzkumy v oblasti geopolimerů

Ke znovuzrození alkalicky aktivovaných materiálů došlo téměř až po třech tisících letech a to v roce 1939 v souvislosti s rozvojem výroby alkalicky aktivovaných cementů. Alkalická aktivace se původně používala pro zlepšení mechanických vlastností betonu tím způsobem, že se do cementů přidávaly příměsi s latentními hydraulickými vlastnostmi jakou jsou popílký, vysokopecní struska apod. Později se kromě výše uvedených přísad začaly jako alkalicky aktivované materiály používat přírodní hlinitokřemičitany, především jílové materiály. Joseph Davidovits patentoval pod názvem kopolymery v roce 1979 alkalické cementy, ve kterých byl použit metakaolin jako hlinitokřemičitá složka, který se připravil kalcinací s vápencem nebo dolomit. V té době, nezávisle na Davidovitsovi, byly materiály na stejné bázi připraveny také ve Finsku (F-cement) a na Ukrajině (Geocements) [2].

Výzkum alkalicky aktivovaných materiálů pokračuje i nadále a zaměřuje se na studium využití v různých průmyslových odvětvích. Pro svou extrémní odolnost mohou sloužit především jako vynikající izolace a stavební materiál. Geopolymerní cement Parament byl například použit pro opravu letištní plochy v Los Angeles. V brzké době lze očekávat využití geopolimerů při výstavbě silnic, protihlukových stěn, mostů, budov a jiných původně betonových staveb. Do budoucna pak může být velmi podstatná stabilizace nebezpečných a radioaktivních odpadů pomocí geopolymerních matic (tzv. solidifikace) [5].

2.1.3 Struktura geopolymerů

V důsledku chemické reakce aluminosilikátových látek vzniká trojrozměrná polymerní síť. Pro tyto aluminosilikátové amorfnní látky navrhl Davidovits terminologii polysialát, což znamená poly (silico-oxo-aluminate) v závislosti na poměru Si/Al [1].

Jejich empirický vzorec je:



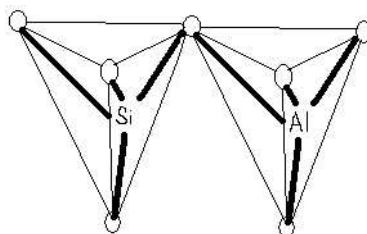
kde M je atom K, Na nebo Ca, n je stupeň polykondenzace a z je počet tetraedrických jednotek ($z=1,2,3,\dots,32$).

Geopolymer může mít jednu ze tří základních forem podle poměrů Si/Al (Davidovits 1999) **obr. 1 – obr.3** [3].

1. *Polysialáty* :

Si / Al = 1

(-Si-O-Al-O-)

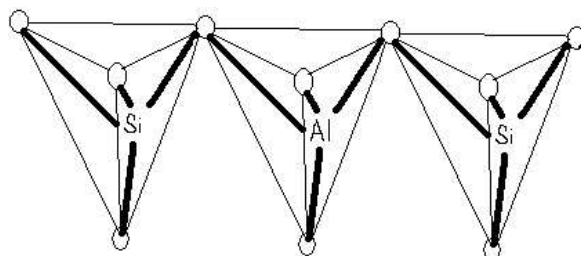


Obr. 1 Prostorové uspořádání PS [3]

2. *Polysiloxo-sialáty* :

Si / Al = 2

(-Si-O-Al-O-Si-O-)

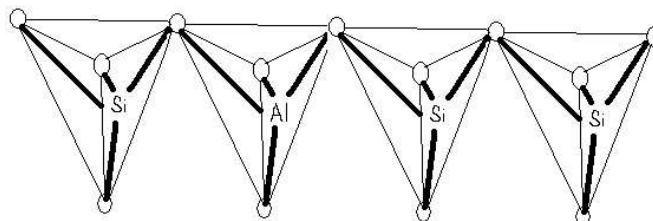


Obr. 2 Prostorové uspořádání PSS [3]

3. *Polydisiloxo-sialáty* :

Si / Al = 3

(-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-)



Obr. 3 Prostorové uspořádání PSDS [3]

2.1.4 Vlastnosti geopolymérů

Geopolymerní materiály jsou podobné skelným materiálům, ale také např. portlandskému cementu. Se skelnými materiály mají podobné trojrozměrné uspořádání, avšak ve struktuře skla není přítomna voda a sklo je prakticky neporézní. Spojitost s portlandským cementem je, že se v obou případech jedná o hydraulické pojivo, tudíž po zatvrdnutí odolávají působení vody [1].

Co se týče fyzikálních vlastností, tak geopolymery jsou pevné polymerní sloučeniny odolné vůči teplotě až do 1000°C, zředěným kyselinám a zásadám. Avšak tyto vlastnosti závisí na surovinách a také na podmínkách kopolymerace. Poměr pojiva a plniva ovlivňuje některé mechanické vlastnosti jako jsou poróznost, pevnost apod. Pevnost v tlaku je poté dána právě množstvím a druhem plniva a nabývá hodnot mezi 10-60 Mpa, v závislosti na druhu přípravy [7,8].

Tři hlavní vlastnosti, kterými geopolymery převyšují komerční materiály jsou [9]:

- a) Velmi snadná příprava, není potřeba vysokých teplot.
- b) Mají vyšší tepelnou odolnost než směsi organické. Testy vzplanutí geopolymerních materiálů obsahujících uhlíková vlákna ukázaly, že hořet nebudou vůbec, bez ohledu na to, kolik času pro zapálení materiálu ponecháme.
- c) Mechanické vlastnosti mají stejně dobré jako vlastnosti organických směsí. Kromě toho geopolymery odolávají všem organickým rozpouštědlům.

2.1.5 Suroviny pro přípravu geopolymérů

Pro alkalickou aktivaci se používají křemičité, nebo častěji hlinito-křemičité materiály, které se vyznačují latentními hydraulickými vlastnostmi. Do této skupiny lze zařadit materiály jak přírodního, tak syntetického původu.

2.1.5.1 Suroviny z přírodního materiálu

Metakaolin

Metakaolin patří mezi jílovité materiály. Chemicky se jedná o vysoce reaktivní bezvodý hlinitokřemičitan, který se získává tepelnou úpravou (kalcinací) kaolinu a kaolinických jílů v rozmezí teplot 650 – 800 °C. Reaktivita metakaolinu je závislá na kalcinační teplotě, která se pohybuje optimálně okolo hodnoty 700°C.

Jedná se o materiál, který se díky své všeobecné dostupnosti pro přípravu geopolymerních systémů využívá nejčastěji [10].

Materiály vulkanického původu

Materiály vulkanického původu jsou další přírodní materiály, které jsou vhodné pro přípravu geopolymérů jsou materiály pocházející ze sopečné činnosti. Sopečné materiály zahrnují přírodní porculány (sopečný popel), které patří mezi hydraulicky aktivní látky, dále mezi ně patří čedič, vulkanické sklo a vulkanická tuf [11].

2.1.5.2 Suroviny z odpadních materiálů

Popely a popílký

Popely a popílký jsou odpady vzniklé při spalování uhlí při teplotách až 1600°C. Z chemického hlediska se jedná o heterogenní materiály, které se skládají z více komponent o rozdílném chemickém, fyzikálním a mineralogickém složení. Hlavní vliv na složení má typ uhlí, kde fyzikální a chemické vlastnosti závisí na spalovacím procesu, tvaru zrn a zdroji těžby. Pro použití při geopolymeraci musí splňovat určité požadavky. Důležitý je obsah křemíku a hliníku. Dále také nesmí obsahovat velké množství těžkých kovů nebo jiných zdraví škodlivých látek, aby nedošlo ke kontaminaci životního prostředí [11].

Strusky

Struska je vedlejším produktem při výrobě surového železa ve vysoké peci. Vzniká rychlým ochlazením taveniny nacházející se nad roztaveným železem. Po rozemletí vykazuje struska pucolánové vlastnosti tj. s alkalickými roztoky vznikají pevné materiály. Strusky jsou převážně z oxidů s příměsemi sloučenin síry, fosforu a kovových částic. Struska je odpadní a tudíž levnější materiál pro přípravu kopolymerů [12].

2.1.5.3 Alkalické aktivátory

Alkalický aktivátor je velmi důležitou složkou geopolymerní reakce a zásadně ovlivňuje pevnost (s rostoucí koncentrací aktivátoru roste mechanická pevnost směsí) a další vlastnosti vzniklého produktu. Množství aktivátoru se liší v závislosti na ostatních složkách. Jako aktivátory můžeme použít alkalické roztoky sodíku, draslíku a lithia, což jsou např. hydroxidy, uhličitany a vodní skla [8].

Hydroxidy

Hydroxidy sodné a draselné jsou bezbarvé, silně hygroskopické, leptavé chemické látky, které se dobře rozpouštějí ve vodě a ethanolu. Výjimku však tvoří hydroxid lithný, který je ve vodě i v ethanolu jen slabě rozpustný. Pohlcují oxid uhličitý za vzniku uhličitánů a ostatní plyny kyselé povahy. Jedná se o silně korozivní sloučeniny, které leptají i sklo a porcelán.

Alkalické soli – uhličitany alkalických kovů

Uhličitany jsou soli kyseliny uhličitě. S výjimkou uhličitanu sodného, draselného a amonného se téměř nerozpouštějí ve vodě. Všechny se však rozkládají působením kyselin silnějších než je kyselina uhličitá a zahříváním. Pro přípravu geopolymerních malt se nejčastěji používají uhličitan sodný Na_2CO_3 (soda) a uhličitan draselný K_2CO_3 (potaš). Ostatní uhličitany, např. uhličitan lithný Li_2CO_3 , se díky nízké rozpustnosti ve vodě nepoužívají [6].

Vodní sklo

Vodní sklo je v podstatě vodný koloidní roztok alkalického křemičitanu (sodného, draselného a někdy i lithného), vznikající rozpouštěním příslušného alkalicko-křemičitého skla ve vodě. Vyrábí se tavením oxidu křemičitého ve formě skla nebo křemenného písku s uhličitany nebo hydroxidy alkalických kovů při teplotě 1300 – 1400 °C za vzniku ve vodě rozpustných křemičitanů. Ze vzniklé taveniny se získají chlazením vodou granule pevného křemičitanu sodného. Rozpuštěné vodní sklo se získává z granulí v autoklávu, do nějž se za míchání zavádí vodní pára pod tlakem (1,47 MPa). Nejvýznamnější a také nejčastější měřenou vlastností kapalného vodního skla je hustota, jež poskytuje informaci o koncentraci, resp. o složení výchozího skla [13].

2.1.6 Mechanismus geopolymerace

Podmínkou pro alkalickou aktivaci je silně zásadité prostředí ($\text{pH} > 12$), aby mohlo dojít k rozkladu trojrozměrné struktury výchozího hlinitokřemičitanu za vzniku křemičitanových a hlinitanových anionů. Rozsah rozpouštění závisí hlavně na koncentraci zásaditého roztoku a na složení základního hlinito-křemičitého materiálu, dále potom na kationtu alkalického kovu v zásaditém roztoku, na rychlosti míchání a na době rozpouštění [3, 8]. Rozpuštěním vznikne sol, ve kterém na místech, kde se vedle sebe nacházejí ionty obsahující křemík a hliník společně s hydroxylovými ionty OH, začne docházet ke vzniku gelu a ke kondenzaci jednotlivých molekul. V této fázi

začíná docházet k tuhnutí reakční směsi, při kterém se z geopolymerní matrice postupně uvolňuje voda a vznikají tak pro kopolymery charakteristické póry. Zároveň při tuhnutí dochází k dalšímu růstu polymerního řetězce a k síťování.

Všechny tři části geopolymery, tj. rozpouštění, tvorba gelu a samotná polykondenzace, probíhají vždy současně a nelze je tak zkoumat odděleně [14].

2.2 Hořlavost dřeva

Dřevo stále je a v nejbližší budoucnosti zůstane jedním z nejpoužívanějších stavebních konstrukčních materiálů. Přes své nesporně výborné vlastnosti, jako je např. snadná opracovatelnost, výhodný poměr mezi pevností a hmotností konstrukce, značná odolnost proti korozi atd., má však přírodní dřevo a materiály na jeho bázi i některé závažné nedostatky omezující rozsah jeho použití. Nejzávažnějšími z nich jsou malá odolnost proti napadení biotickými škůdci (houby, plísně, hmyz) a jeho snadná zápalnost a hořlavost. Příčinou obou těchto nedostatků je skutečnost, že dřevo je organická hmota složená převážně z uhlíku (50 %), kyslíku (42 %) a vodíku (5 %). Dostatečně dimenzované dřevěné trámy (krovy, stropní konstrukce ap.) zachovávají při požárech svoji stabilitu a únosnost několikanásobně déle než např. ocelové, které jsou klasifikovány jako „nehořlavé“ [15].

2.2.1 Mechanismus působení tepelné energie na dřevo

Dlouhodobým termickým zatěžováním dřeva v oblasti teplot +80°C až +120°C se dřevo převážně pouze vysušuje (uvolňuje se z něj volná i vázaná voda), čímž se zvětšuje jeho vnitřní povrch přicházející do styku se vzduchem (kyslíkem), proto je vysušené dřevo snadněji zapalitelné. Povrchovým efektem je tvorba trhlin, uvolňování (vytékání) pryskyřice z jehličnatého dřeva a mírné zhnědnutí dřeva. Mechanické vlastnosti dřeva se prakticky nemění.

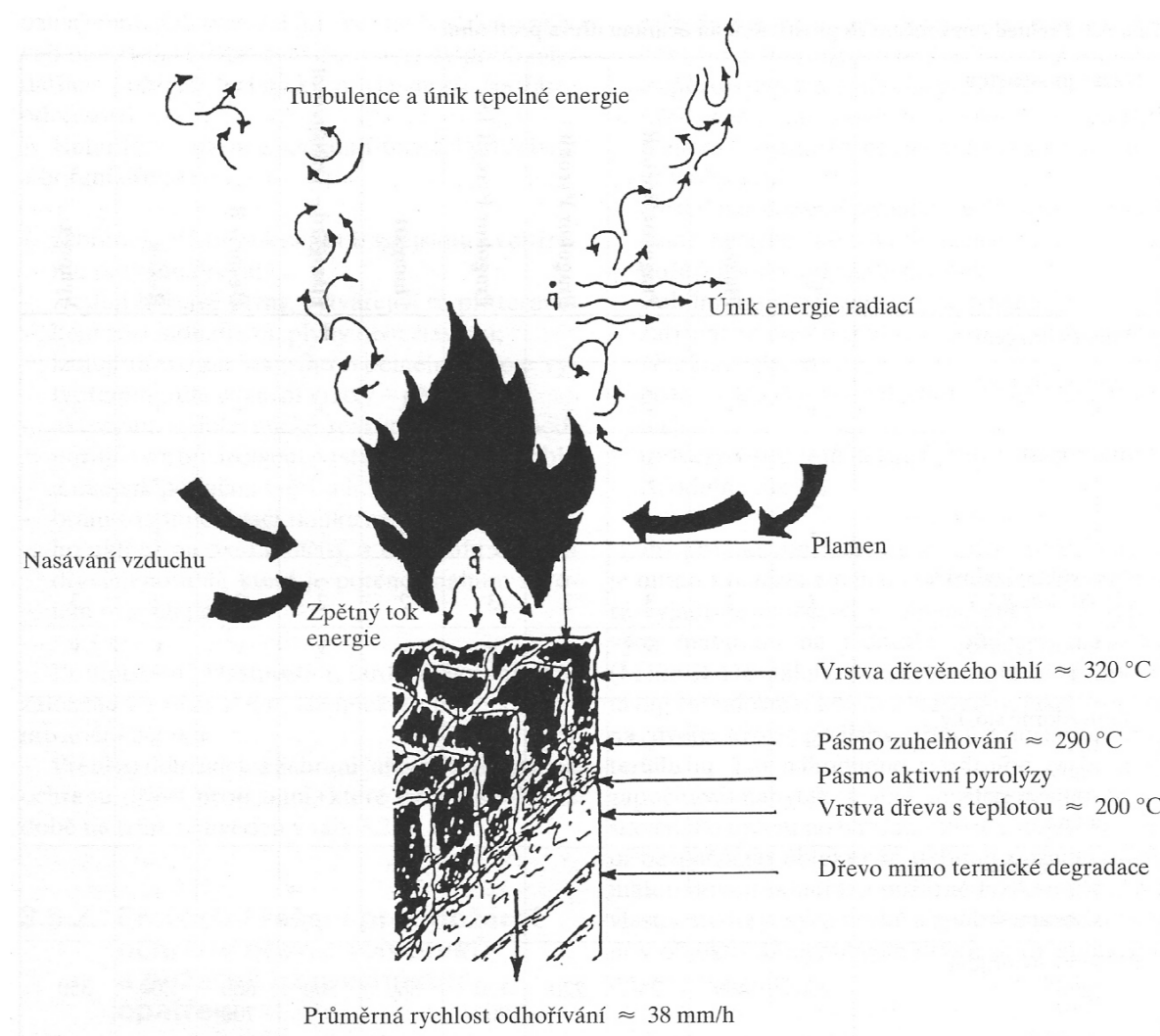
První stupeň vlastní termické degradace dřevní hmoty je možno pozorovat při teplotách +150°C až +200°C. Dřevo při ní mění výrazně barvu do hnědých odstínů a nastává již pozorovatelný pokles mechanických vlastností dřeva, zvláště houževnatosti. K významnému uvolňování hořlavých plyných produktů ještě při těchto teplotách nedochází.

Druhý stupeň termické degradace dřevní hmoty se začíná uplatňovat většinou při teplotách nad +220°C a jejím výsledkem je tvorba plyných produktů: vodíku,

methanu, oxidu uhelnatého, aldehydů, ketonů a dalších nízkomolekulárních produktů. Po difuzi nad povrch dřeva tyto hořlavé nízkomolekulární látky reagují se vzdušným kyslíkem za vývoje tepla a se světelnými efekty (hoří). Hořením dřeva se tudíž v této fázi rozumí hoření uvolňovaných plynů. Pyrolýzou dřevní hmoty se rovněž významně snižují mechanické vlastnosti - pevnost dřeva.

Výsledkem termické degradace dřevní hmoty (pyrolýzy) je dřevěné uhlí, které při teplotách nad cca $+350^{\circ}\text{C}$ za přítomnosti vzdušného kyslíku samovolně bezplamenně hoří (žhne), čímž uvolňuje další tepelnou energii potřebnou pro pyrolýzu dalších (vnitřních) vrstev dřeva.

Konečným produktem hoření dřeva je anorganický zbytek (dřevěný popel) [15].



Obr. 4 Schéma hoření [15]

2.2.2 Ochrana proti ohni

Je nutné si uvědomit, že žádnou ochranou nelze dřevo učinit naprosto nehořlavým a dlouhodobě odolným proti tepelnému namáhání. Dlouhodobým působením ohně nebo vysokých teplot na dřevo dojde, jak již bylo popsáno výše, k jeho tepelné degradaci (zuhelnatění) a tím i ke ztrátě pevnostních parametrů.

Snížení hořlavosti dřeva, oddálení jeho vznětlivosti, zpomalení rychlosti hoření a šíření plamene po povrchu je možné dosáhnout několika způsoby:

1. Chránit dřevo před zahřátím na vyšší teplotu obalem vhodnými inertními tepelně izolujícími hmotami a tím oddálit tvorbu nehořlavých plynů.

Jedná se např. o:

- obložení (zasypání) nehořlavými hmotami s nízkou tepelnou vodivostí (pískem, škvárou, popelem, šterkem),
- omítnutí vápennou maltou s eventuálním. přídavkem experlitu,
- obalení minerální plstí (čedičovou nebo skelnou vatou).

Tento způsob ochrany je nejsnazší a nejúčinnější, ale má i svá rizika a nedostatky. Například není použitelný ve všech případech, ať už z hlediska konstrukčního nebo estetického. Často hrozí nebezpečí oddělení (odpadnutí) poměrně tlusté ochranné vrstvy od podkladu buď mechanickým poškozením nebo časem (stárnutí materiálu, pnutí), případně až při vlastním požáru.

2. Zředit vznikající hořlavé plyny (do té míry, že se stanou nezápalnými) a zabránit přístupu kyslíku ke dřevu při hoření.

Zředění již vzniklých rozkladných produktů dřeva lze docílit nátěry nebo impregnací dřeva takovými chemickými látkami, které se zvýšenou teplotou rozkládají na několik jednodušších sloučenin, většinou plyných. Tyto jsou nehořlavé, unikají na povrch dřeva spolu s pyrolýzami plyny a zředí je natolik, že nemohou vznikat zápalné a hořlavé směsi. Pro tento účel jsou vhodné např.:

- amonné soli (fosforečnany, síran, halogenidy, boritany),
- sloučeniny obsahující krystalickou vodu (borax, soda, kamenec hlinito-draselný, chlorid vápenatý, aj.).

3. Podpořením tvorby zuhelnatělé izolační vrstvy a zamezení žhnutí vzniklého dřevěného uhlí.

Zuhelnatění povrchové vrstvy dřeva má významný tepelně izolační efekt, což zpomaluje postup hoření a může v krajním případě u silnějších dimenzí způsobit i samovolné přerušení hoření (jak je dostatečně známo z praxe, např. zachovalé a stojící konstrukce dřevěných krovů po požárech). Jsou známy takové chemické sloučeniny, které působí na reakční mechanismus při rozkladu dřeva teplem tím, že podporují rychlost tvorby dřevěného uhlí. Jedná se především o látky, které mají kyselou reakci. Do této skupiny látek patří především opět amonné sloučeniny (fosforečnany, halogenidy, síran), kyselina boritá a boritany. Dodatečnému žhnutí již zuhelnatělé vrstvy dřev zabraňují především fosforečnany, boritany, octany i halogenidy. Naopak žhnutí podporují soli železa, chromu, sírany a další látky.

V praktickém užití se jednotlivé způsoby ochrany (ochranné účinky) prolínají, protože komerční ochranné prostředky mají obvykle mnohostranný účinek dosažený vhodnou kombinací více základních látek [15].

2.2.3 Základní pojmy

- **Hořlavost** - schopnost stavebních hmot (dřeva) vznítit se, hořet a/nebo žhnout účinkem zdroje vznícení.
- **Zdroj vznícení** - zdroj tepelné energie (plamen, žhavé těleso, jiskra) schopný stavební hmotu vznítit (zapálit); tj. uvést do stavu hoření a/nebo žhnutí.
- **Vznícení (zapálení)** - začátek hoření.
- **Hoření** - fyzikálně chemický děj, vyvolaný zdrojem vznícení a projevující se uvolňováním tepla, doprovázený světelným efektem a plameny.
- **Žhnutí** - fyzikálně chemický děj vyvolaný zdrojem vznícení; doprovázený světelným efektem, ale bez plamenů (bezplamenné hoření).
- **Požár** - nekontrolované hoření stavební konstrukce, způsobující porušení její funkce.
- **Požární odolnost** - schopnost stavební konstrukce odolávat teplotám vznikajícím při požáru, aniž by došlo k porušení její funkce, tj. ztrátě nosnosti, stability, porušení celistvosti nebo překročení mezních teplot [15].

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Použité materiály

Popílek

- jemně mletý křemičitý popílek K6 z vysokoteplotního spalování

Jemné kamenivo

- čistý jemně rozdrcený SiO_2

Skleněné textilní vlákna

- zkrácené sklovláknité prameny (v délce cca 5mm)

Cement

- komerčně dodávaná prášková složka Cement Baucis L160 složka A

Hydroxid sodný

- zkušební verze Activator Baucis L160, České lupkové závody a.s.

Siloxid

- oxid křemičitý vyráběný srážením vodního skla (křemičitanu sodného) kyselinou solnou

Sklo

- skleněná drť (o velikosti 1 – 6 mm), Technistone a.s. Hradec Králové

3.2 Použité přístroje

Digitální váhy

Vibrační stůl

Termokamera Fluke Ti25

- Blue Panther s.r.o., Praha

Plynová pájecí lampa Rothenberg

- provozní teplota 650 °C

3.3 Příprava zkušebních vzorků

Zkušební vzorky se skládaly ze dvou rozměrových typů ze tří druhů dřeva. Prvním typem byly desky o rozměrech 375x300x10mm pro dřevotřísku a 375x300x20mm pro smrk a dub.

Geopolymerní směsi byly homogenizovány v míchačce a následně pak nanесeny na povrch dřeva. Na hrany dřeva byly tmelovým lepidlem připevněny desky z plexiskla, které při nanášení směsi zabraňovaly jejímu unikání a zaručovaly rovnoměrný povrch nanесené vrstvy.



Obr. 5 Příprava zkušebního vzorku 375x300x10mm



Obr. 6 Příprava zkušebního vzorku 375x300x20mm

3.4 Příprava směsí

Pro následné měření byly připraveny čtyři různé směsi, z nichž některé se ukázaly jako nevhodné pro další přípravu a testování.

3.4.1 Příprava směsí pro testování ohnivzdornosti

K následným měřením byly připraveny čtyři směsi, dále označené písmeny A, B, C, D. Směsi byly nanášeny na smrkové, dubové a dřevotřískové desky o rozměrech 375x300x20(10)mm.

Směs A byla připravena smícháním cementu a aktivátoru Balcius L160 a následně homogenizována po dobu pěti minut. Poté bylo ke směsi přidáno nadrcené kamenivo SiO_2 společně s dalším množstvím aktivátoru směs byla dále homogenizována dalších 10 minut. Aktivátor se během druhé homogenizace přidával optimálně vzhledem k požadované konzistenci. Následně se směs nanasla na připravený povrch dřeva a vyrovnána na vibračním stole. Vzorek byl překryt igelitem, aby se zamezilo poškození povrchu vzduchem (praskliny, bubliny). Vzorky byly ponechány normálnímu zrání při laboratorní teplotě.

Směsi B, C a D byly připraveny stejným způsobem jako směs A, avšak místo kameniva byla pro směs B použita kombinace elektrárenského popílku K6 a zkrácené sklovláknité prameny. Pro směs C byla použita skleněná drť a pro směs D Siloxid.

Tab. č. 1: Složení směsí

	A	B	C	D
cement	175g	205,9g	140g	187g
I. aktivátor L160	140g	168,5g	85g	149g
kamenivo	135g	-	-	-
popílek K6	-	96g	-	-
skelné vlákno	-	9,6g	-	-
skleněná drť	-	-	288g	-
siloxid	-	-	-	144g
II. aktivátor L160	72,5g	54g	32g	74g

Pozorování:

Během zrání se ukázalo, že směs A není vhodná pro kombinaci s žádným z použitých druhů dřeva. Směs se neuchytila na povrch dřeva, vytvořili se velké praskliny a postupně opadala.

Stejný negativní výsledek jako u směsi A se projevila i u směsi D. Zde se povedlo vytvořit konzistentní povrch jen v případě použití na dřevotřísku. Při aplikaci na smrkové a dubové dřevo se geopolymerní vrstva neuchytila na povrch dřeva, následně se roztrhala na malé části.



Obr. 6 Nežádoucí povrch směsi s kamenivem



Obr. 7 Nežádoucí povrch směsi se siloxidem

4 VÝSLEDKY A DISKUZE

4.1 Testování ohnivzdornosti

Pro testování ohnivzdornosti byly použity smrkové, dubové a dřevotřískové desky o rozměrech 375x300x20(10)mm. Desky byly vystaveny tepelnému namáhání, vyvolanému plynovou pájecí lampou Rothenberg. Teplota plamenu se pohybovala v rozmezí 650 - 700°C. Vzdálenost ústí hlavně lampy od testované desky činila 50 mm.



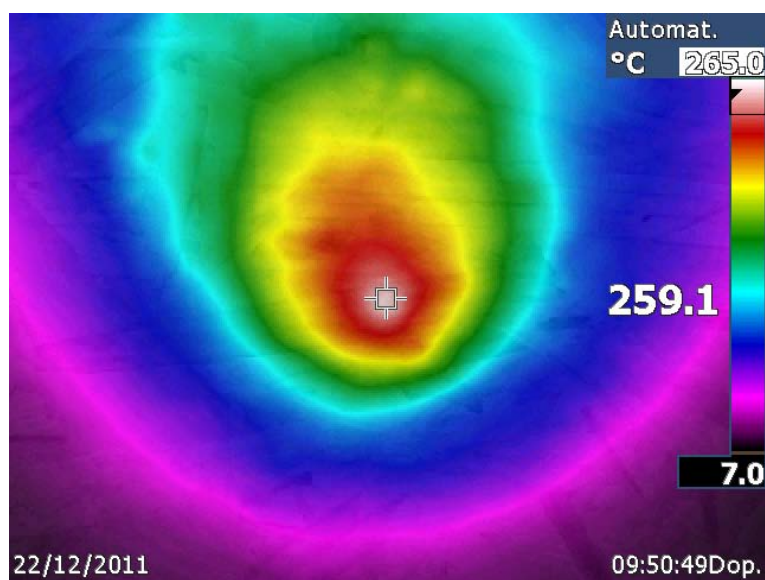
Obr. 9 Testování ohnivzdornosti

4.1.1 Dřevotřísková deska bez povrchové úpravy

Tepelnému namáhání byla vystavena dřevotřísková deska o rozměrech 375x300x10mm. Byl měřen čas, za který dojde k degradaci dřevní hmoty (zuhelnění) na nenamáhané straně desky a tedy i k celkové ztrátě mechanických vlastností.



Obr. 10 Zadní strana desky po 10 minutách



Obr. 11 Teplota na zadní straně desky po 10 minutách



Obr. 12 Prohoření desky po 13 minutách

Vyhodnocení:

K úplnému prohoření desky došlo po 13 minutách.

4.1.2 Dřevotřísková deska s povrchovou úpravou z geopolymerní směsi s obsahem 60 % skleněné drtě

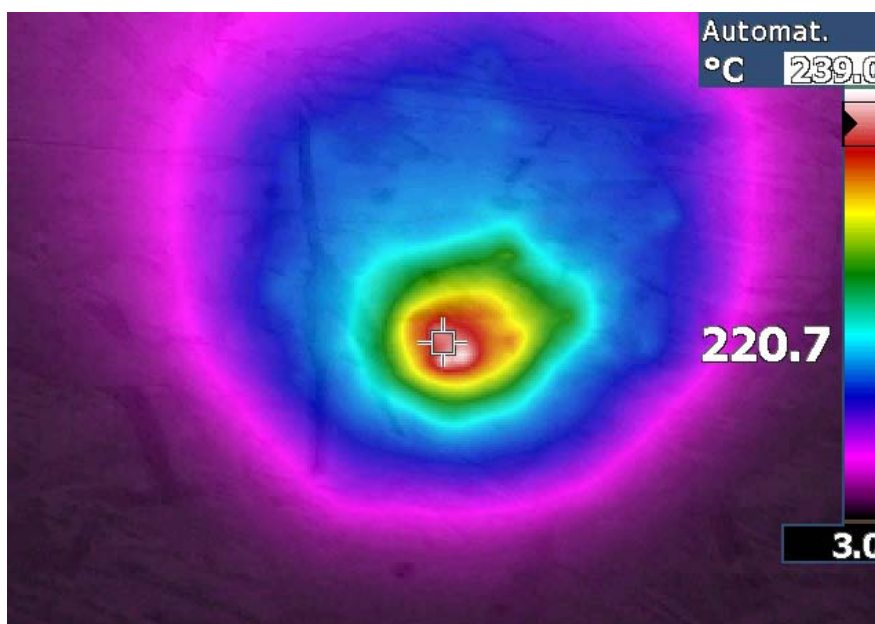
Tepelnému namáhání byla vystavena dřevotřísková deska s povrchovou úpravou ze směsi s obsahem 60 % skleněné drtě o rozměrech 375x300x10mm. Tloušťka vrstvy se liší v důsledku rozdílných velikostí skleněné drtě. Byl měřen čas, za který dojde k degradaci dřevní hmoty (zuhelnění) na nenamáhané straně desky a tedy i k celkové ztrátě mechanických vlastností.



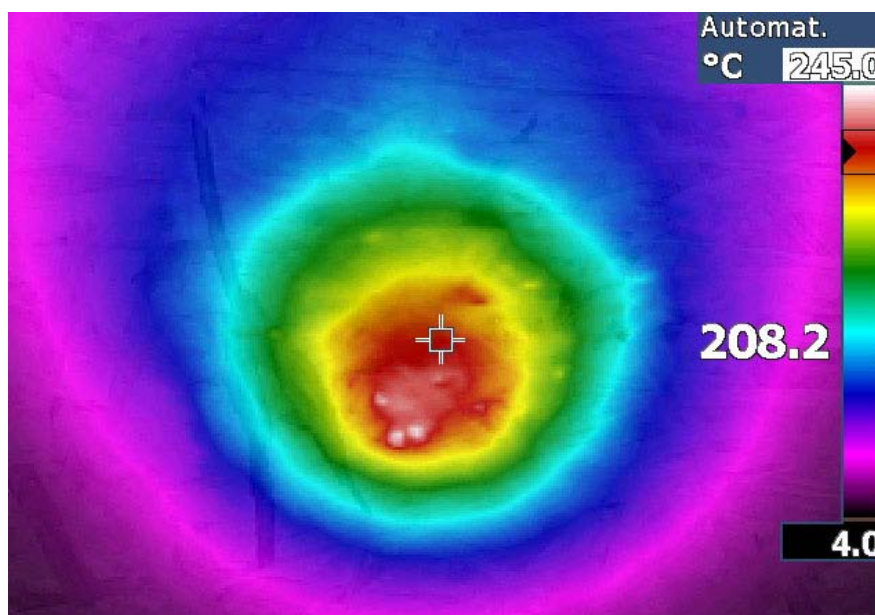
Obr. 13 Dřevotřísková deska s povrchovou úpravou ze směsi s obsahem 60 % skleněné drtě



Obr. 14 Zadní strana desky po 10 minutách



Obr. 15 Teplota na zadní straně desky po 10 minutách



Obr. 16 Teplota na zadní straně desky po 30 minutách



Obr. 17 Degradace po 31 minutách

Vyhodnocení:

K degradaci na zadní straně desky došlo po 31 minutách, což je o 18 minut déle než tomu bylo u desky bez povrchové úpravy. Směs zabránila vznícení desky.

4.1.3 Dřevotříska s povrchovou úpravou z geopolymerní směsi s obsahem 20 % popílku a 2 % skelného vlákna

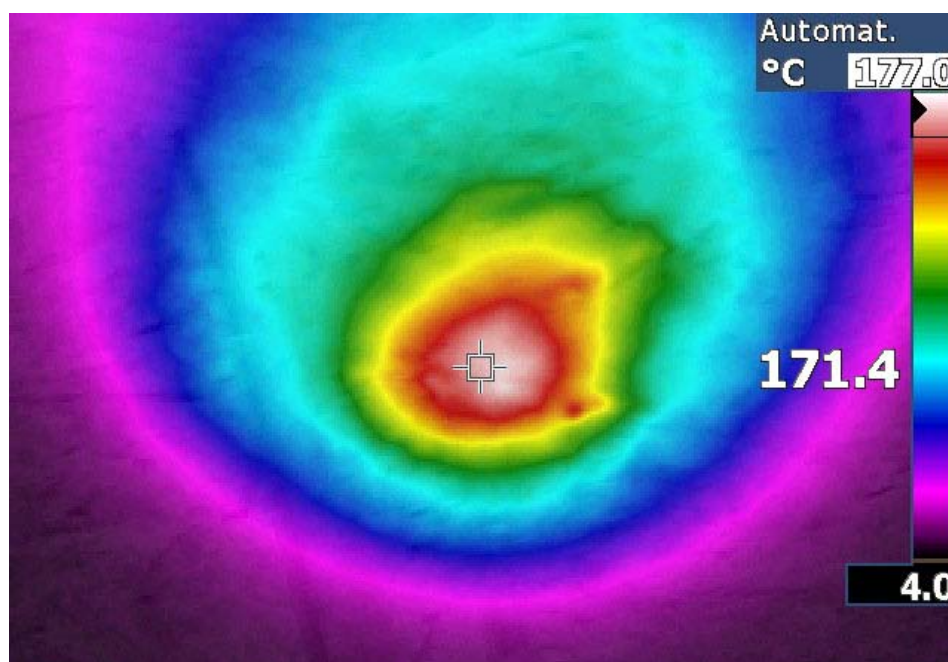
Tepelnému namáhání byla vystavena dřevotřísková deska s povrchovou úpravou ze směsi s obsahem 20 % popílku a 2 % obsahem skelného vlákna o rozměrech 375x300x10mm. Tloušťka vrstvy byla 2 mm. Byl měřen čas, za který dojde k degradaci dřevní hmoty (zuhelnění) na nenamáhané straně desky a tedy i k celkové ztrátě mechanických vlastností.



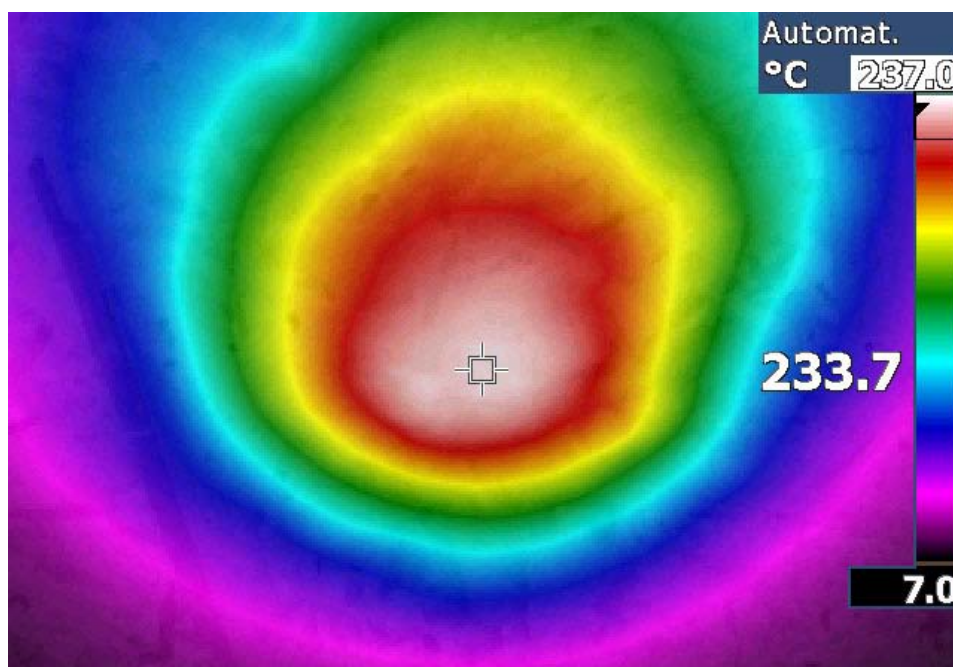
Obr. 18 Dřevotřísková deska s povrchovou úpravou ze směsi s obsahem 20 % popílku a 2 % skelného vlákna



Obr. 19 Zadní strana desky po 10 minutách



Obr. 20 Teplota na zadní straně desky po 10 minutách



Obr. 21 Teplota na zadní straně desky po 30 minutách



Obr. 22 Degradace po 33 minutách

Vyhodnocení:

K degradaci na zadní straně desky došlo po 33 minutách, což je o 20 minut déle než tomu bylo u desky bez geopolymerní směsi. Směs zabránila vznícení desky.

4.1.4 Dřevotřísková deska s povrchovou úpravou z geopolymerní směsi s obsahem 30 % siloxidu

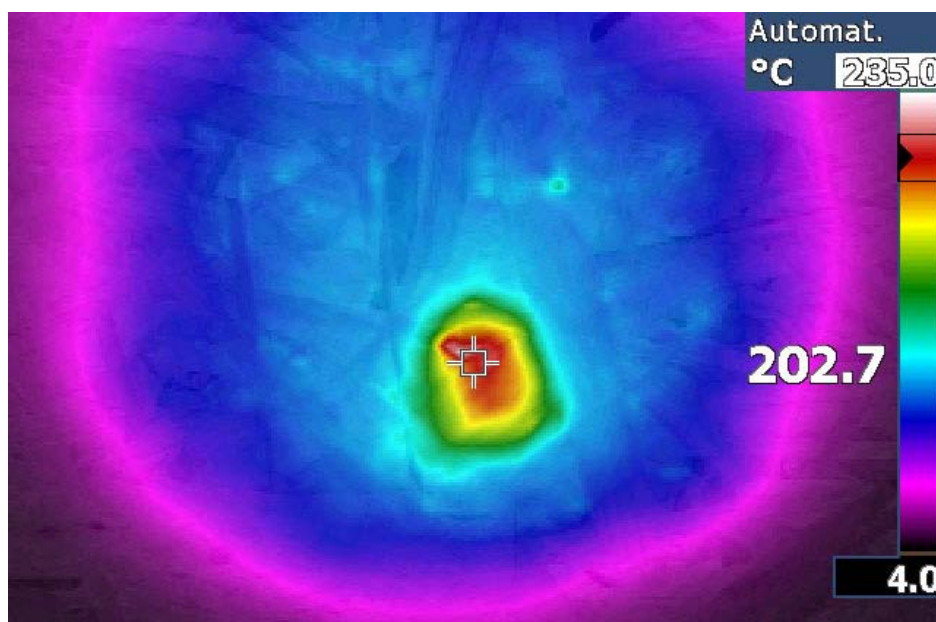
Tepelnému namáhání byla vystavena dřevotřísková deska s povrchovou úpravou ze směsi s obsahem 30 % siloxidu o rozměrech 375x300x10mm. Tloušťka vrstvy byla 2 mm. Byl měřen čas, za který dojde k degradaci dřevní hmoty (zuhlňení) na nenamáhané straně desky a tedy i k celkové ztrátě mechanických vlastností.



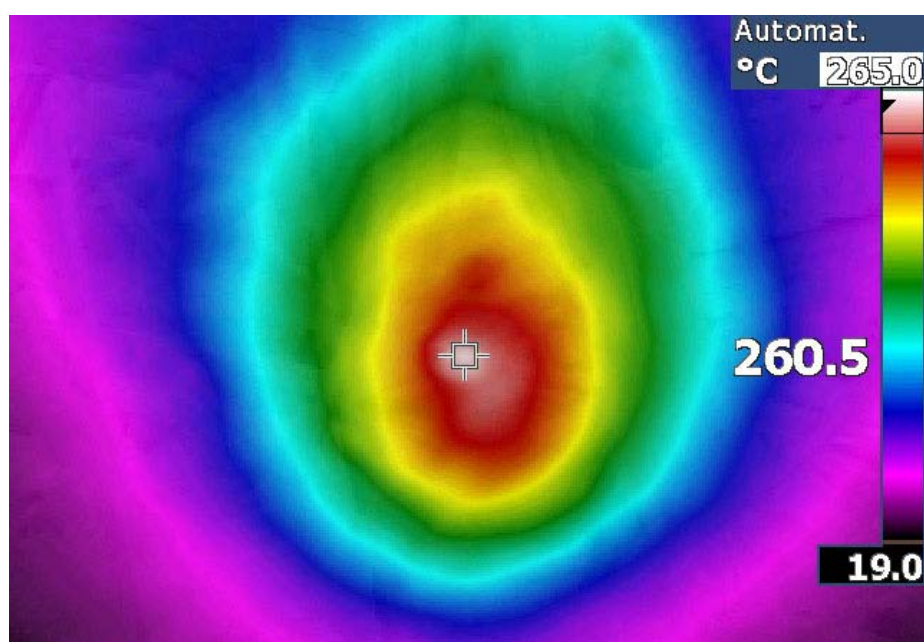
Obr. 23 Dřevotřísková deska s povrchovou úpravou ze směsi s obsahem 30 % siloxidu



Obr. 24 Zadní strana desky po 10 minutách



Obr. 25 Teplota na zadní straně desky po 10 minutách



Obr. 26 Teplota na zadní straně desky po 30 minutách



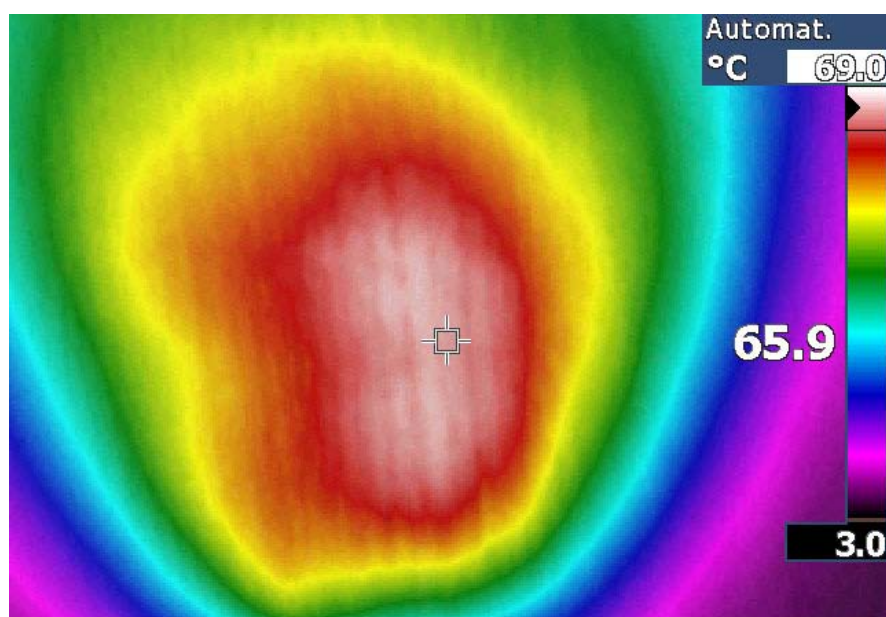
Obr. 27 Degradace po 30 minutách

Vyhodnocení:

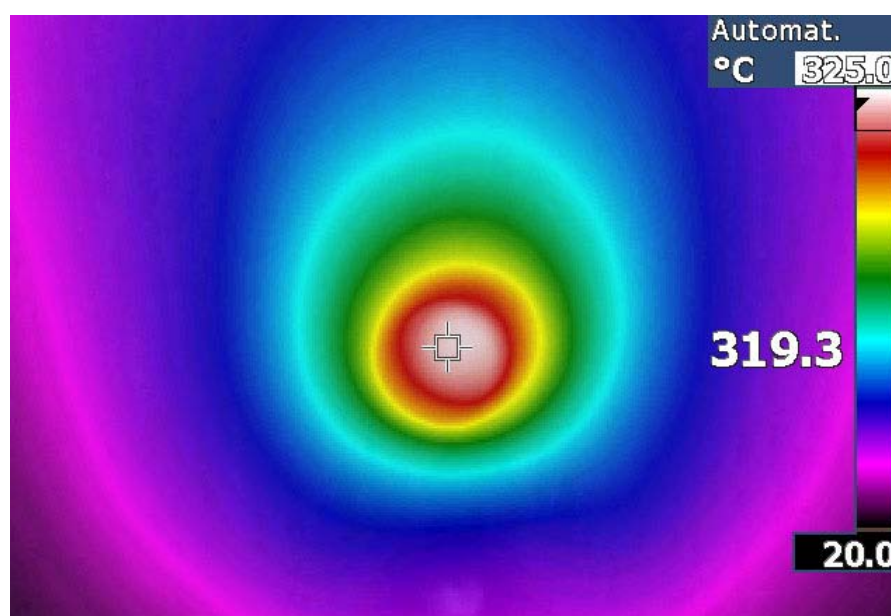
K degradaci na zadní straně desky došlo po 30 minutách, což je o 17 minut déle než tomu bylo u desky bez geopolymerní směsi. Směs stejně jako všechny předchozí zabránila vznícení desky.

4.1.5 Dubová deska bez povrchové úpravy

Tepelnému namáhání byla vystavena dubová deska o rozměrech 375x300x20mm. Byl měřen čas, za který dojde k degradaci dřevní hmoty (zuhelnění) na nenamáhané straně desky a tedy i k celkové ztrátě mechanických vlastností.



Obr. 28 Teplota na zadní straně desky po 10 minutách



Obr. 29 Teplota na zadní straně desky po 25 minutách



Obr. 30 Prohoření desky po 26 minutách

Vyhodnocení:

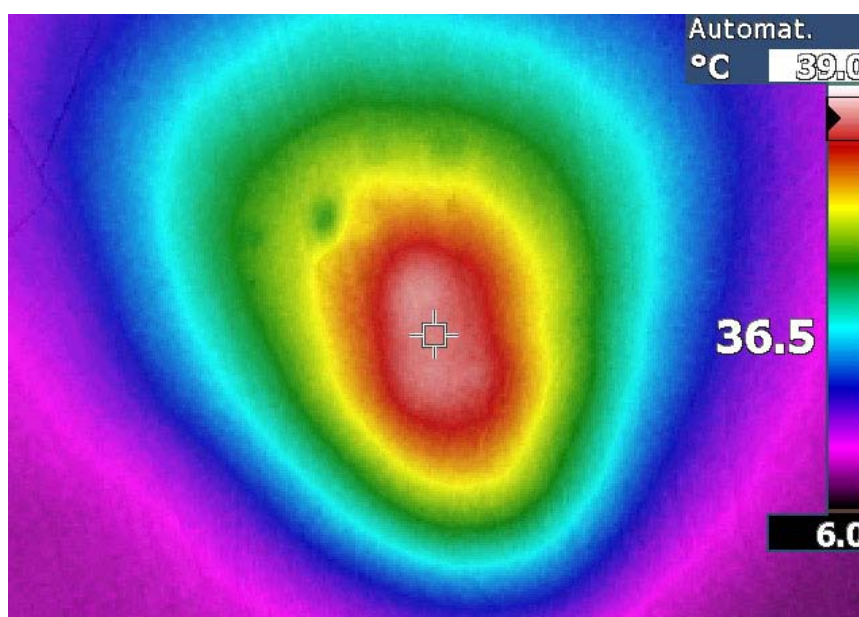
K úplnému prohoření desky došlo po 26 minutách.

4.1.6 Dubová deska s povrchovou úpravou z geopolymerní směsi s obsahem 60 % skleněné drtě

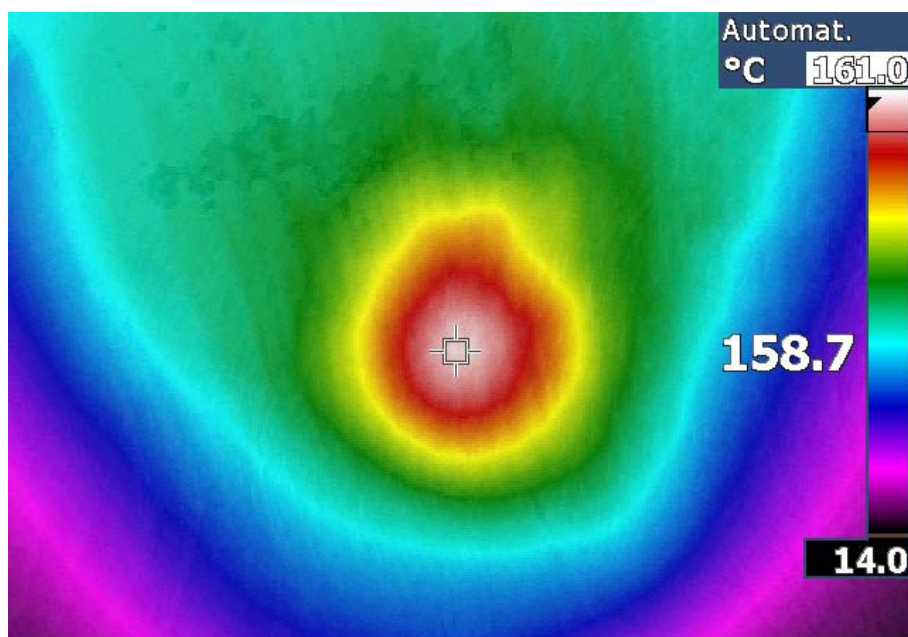
Tepelnému namáhání byla vystavena dubová deska s povrchovou úpravou ze směsi s příměsí 60 % skleněné drtě o rozměrech 375x300x20mm. Tloušťka vrstvy se liší v důsledku rozdílných velikostí skleněné drtě. Byl měřen čas, za který dojde k degradaci dřevní hmoty (zuhelnění) na nenamáhané straně desky a tedy i k celkové ztrátě mechanických vlastností.



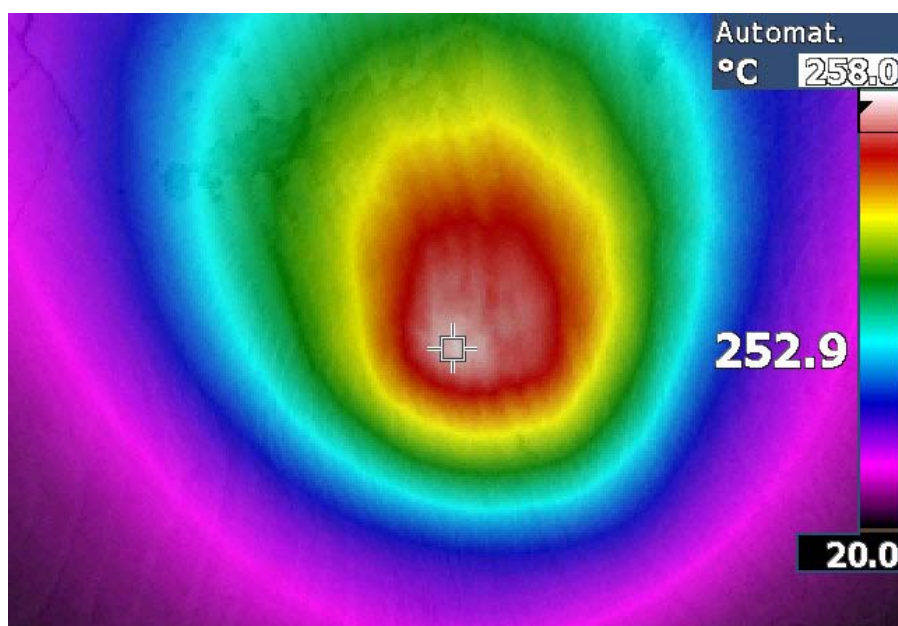
Obr. 31 Dubová deska s povrchovou úpravou ze směsi s obsahem 60 % skleněné drtě



Obr. 32 Teplota na zadní straně desky po 10 minutách



Obr. 33 Teplota na zadní straně desky po 30 minutách



Obr. 33 Teplota na zadní straně desky po 66 minutách



Obr. 34 Degradace po 66 minutách

Vyhodnocení:

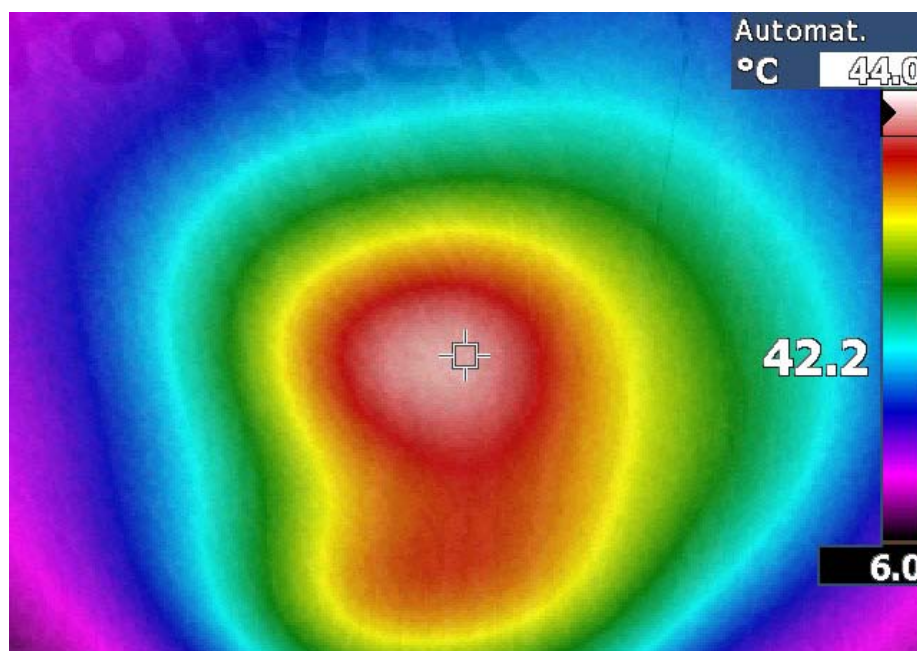
K degradaci na zadní straně desky došlo po 66 minutách, což je o 40 minut déle než tomu bylo u desky bez geopolymerní směsi. Směs brání vzplanutí, tudíž se degradace projevuje zuhelnatěním.

4.1.7 Dubová deska s povrchovou úpravou z geopolymerní směsi s obsahem 20 % popílku a 2 % skelného vlákna

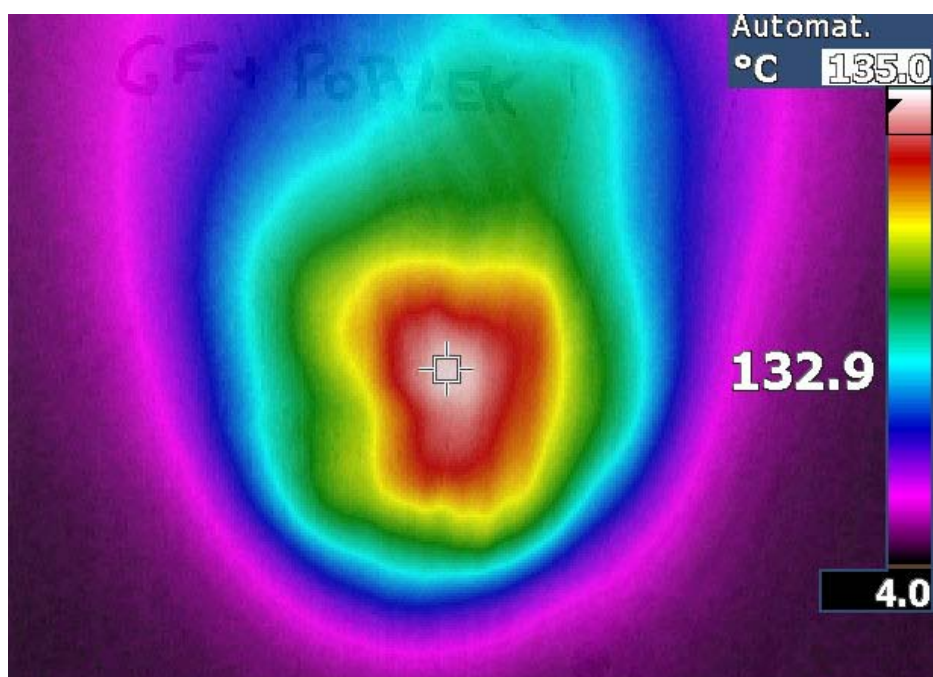
Tepelnému namáhání byla vystavena dubová deska o rozměrech 375x300x20mm s povrchovou úpravou ze směsi s obsahem 20 % popílku K6 a 2 % skelného vlákna. Tloušťka vrstvy byla 2 mm. Byl měřen čas, za který dojde k degradaci dřevní hmoty (zuhelnění) na nenamáhané straně desky a tedy i k celkové ztrátě mechanických vlastností.



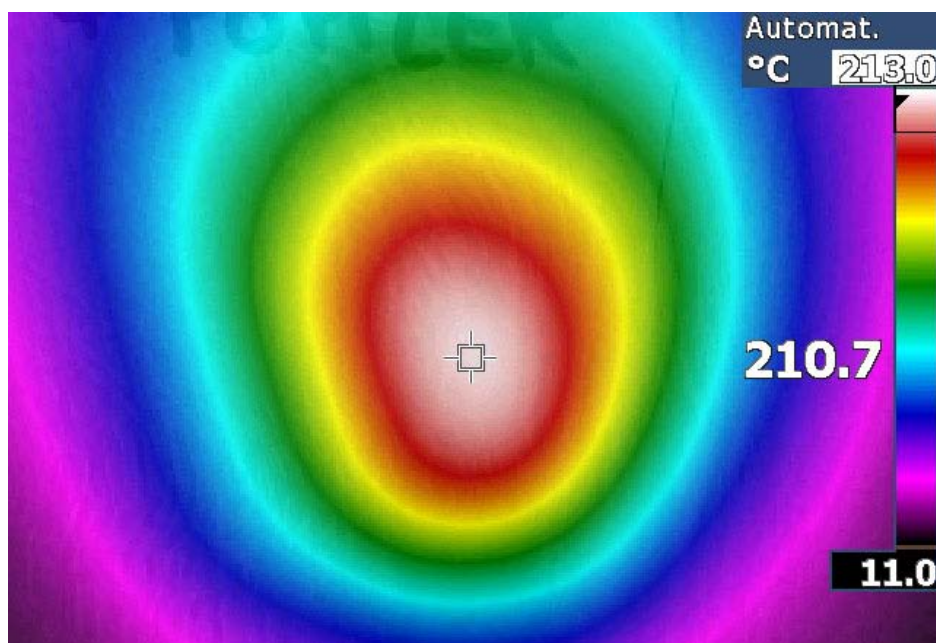
Obr. 35 Dubová deska s povrchovou úpravou ze směsi s obsahem 20 % popílku a 2 % skelného vlákna



Obr. 36 Teplota na zadní straně desky po 10 minutách



Obr. 37 Teplota na zadní straně desky po 30 minutách



Obr. 38 Teplota na zadní straně desky po 74 minutách



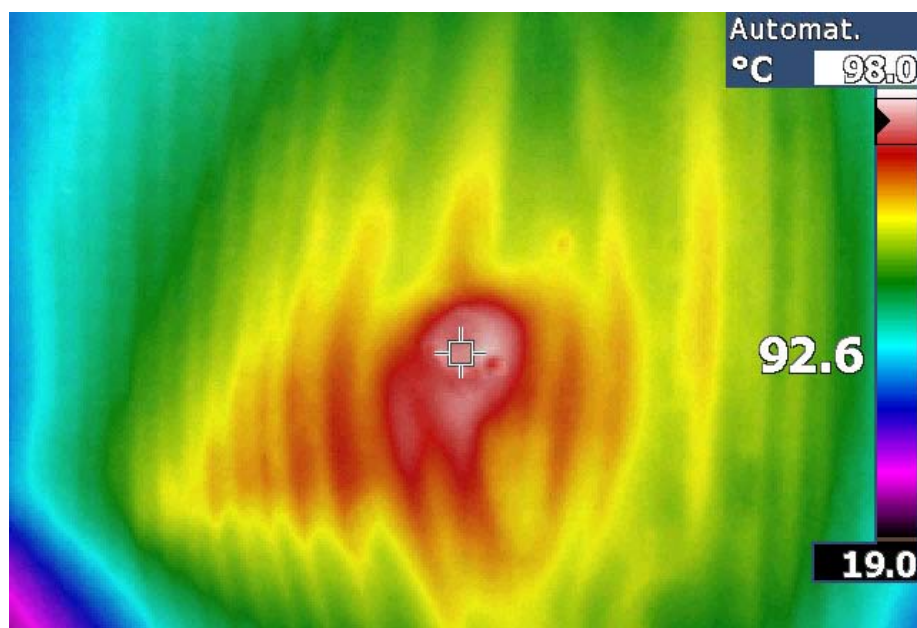
Obr. 39 Degradace po 74 minutách

Vyhodnocení:

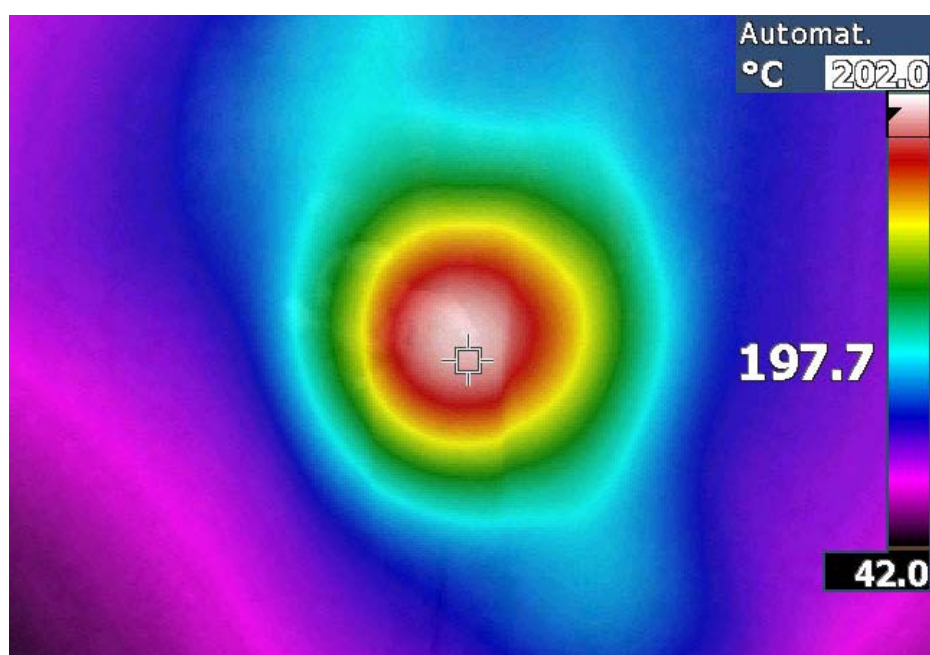
K degradaci na zadní straně desky došlo po 74 minutách, což je o 48 minut déle než tomu bylo u desky bez geopolymerní směsi. Směs brání vzplanutí, tudíž se degradace projevuje zuhelnatěním.

4.1.8 Smrková deska bez povrchové úpravy

Tepelnému namáhání byla vystavena dubová deska o rozměrech 375x300x20mm. Byl měřen čas, za který dojde k degradaci dřevní hmoty (zuhelnění) na nenamáhané straně desky a tedy i k celkové ztrátě mechanických vlastností.



Obr. 40 Teplota na zadní straně desky po 10 minutách



Obr. 41 Teplota na zadní straně desky po 22 minutách



Obr. 42 Prohoření desky po 24 minutách

Vyhodnocení:

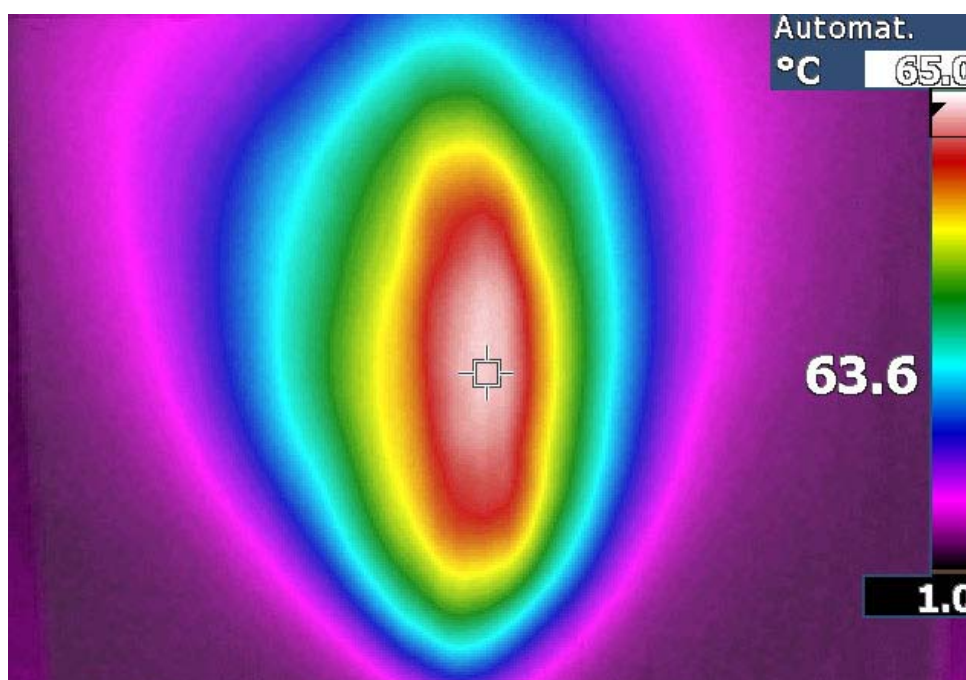
K úplnému prohoření desky došlo po 24 minutách.

4.1.9 Smrková deska s povrchovou úpravou ze směsi s obsahem 60 % skleněné drtě

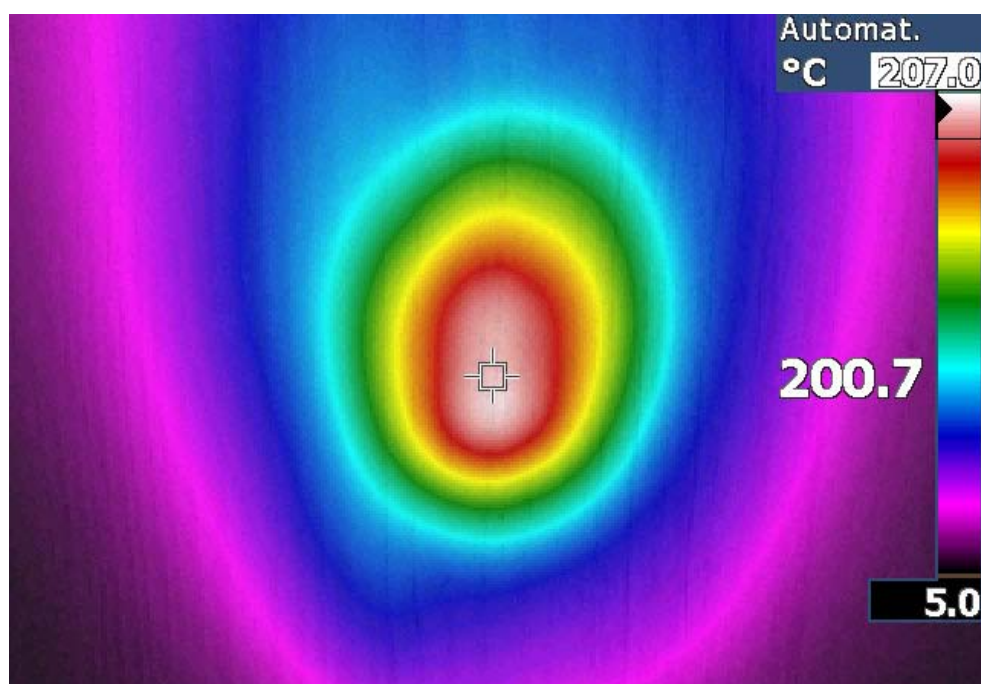
Tepelnému namáhání byla vystavena smrková deska s povrchovou úpravou ze směsi s příměsí 60 % skleněné drtě o rozměrech 375x300x20mm. Tloušťka vrstvy se liší v důsledku rozdílných velikostí skleněné drtě. Byl měřen čas, za který dojde k degradaci dřevní hmoty (zuhelnění) na nenamáhané straně desky a tedy i k celkové ztrátě mechanických vlastností.



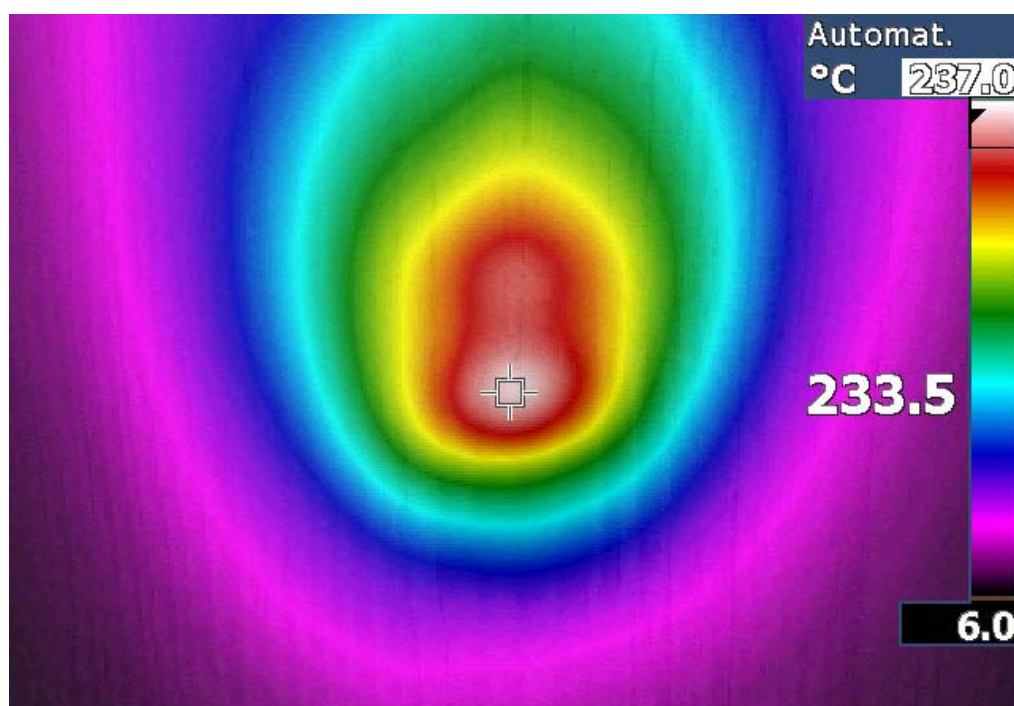
Obr. 43 Smrková deska s povrchovou úpravou ze směsi s obsahem 60 % skleněné drtě



Obr. 44 Teplota na zadní straně desky po 10 minutách



Obr. 45 Teplota na zadní straně desky po 30 minutách



Obr. 46 Teplota na zadní straně desky po 66 minutách



Obr. 47 Degradace po 68 minutách

Vyhodnocení:

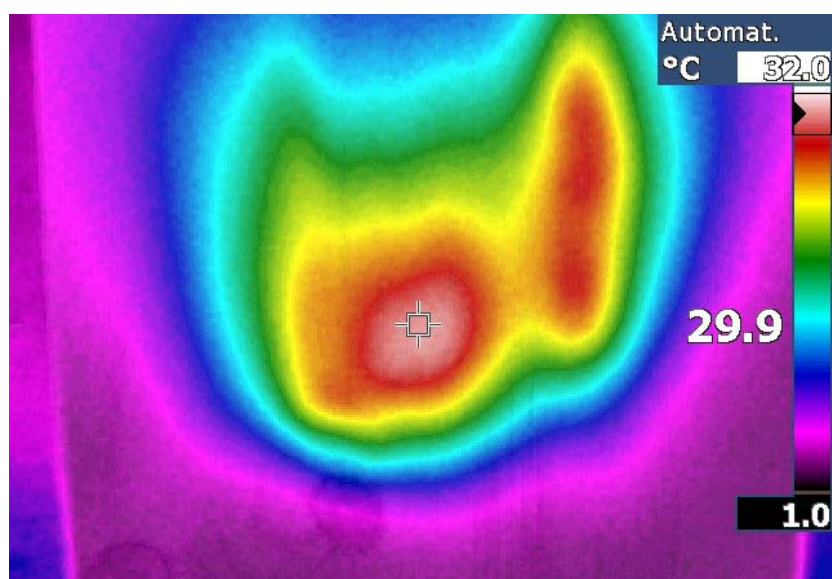
K degradaci na zadní straně desky došlo po 68 minutách, což je o 44 minut déle než tomu bylo u desky bez geopolymerní směsi. Směs brání vzplanutí, tudíž se degradace projevuje zuhelnatěním.

4.1.10 Smrková deska s povrchovou úpravou ze směsi s obsahem 20 % popílku a 2 % skelného vlákna

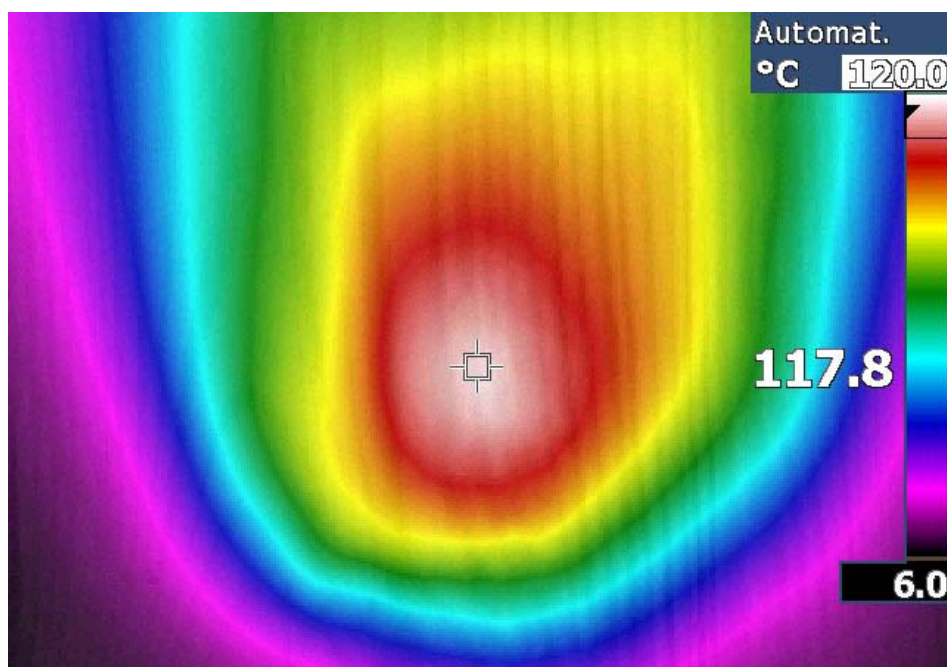
Tepelnému namáhání byla vystavena smrková deska o rozměrech 375x300x20mm s povrchovou úpravou ze směsi s obsahem popílku K6 a skelného vlákna. Tloušťka vrstvy byla 2 mm. Byl měřen čas, za který dojde k degradaci dřevní hmoty (zuhelnění) na nenamáhané straně desky a tedy i k celkové ztrátě mechanických vlastností.



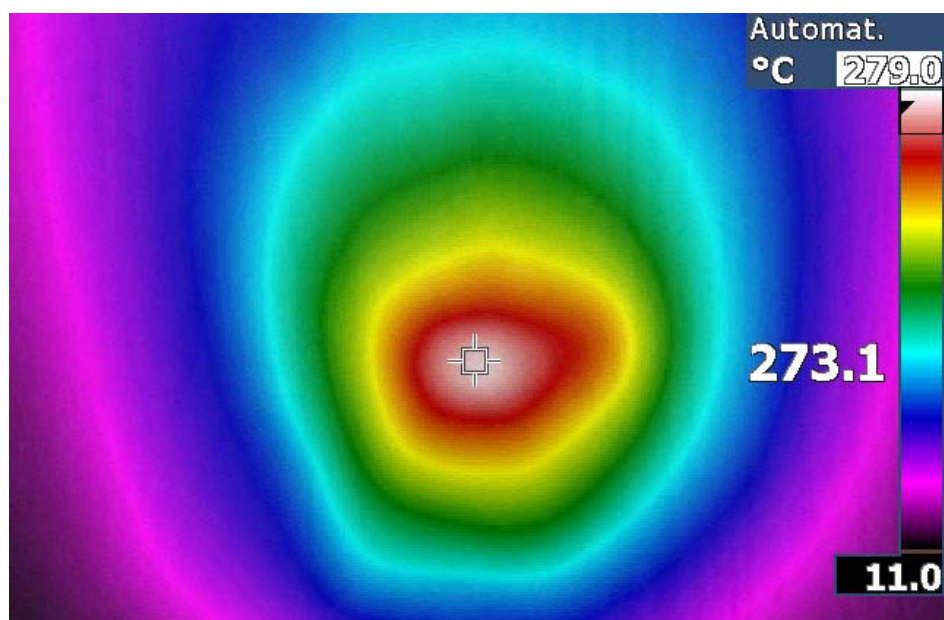
Obr. 48 Smrková deska s povrchovou úpravou ze směsi s obsahem 20 % popílků a 2 % skelného vlákna



Obr. 49 Teplota na zadní straně desky po 10 minutách



Obr. 49 Teplota na zadní straně desky po 30 minutách



Obr. 50 Teplota na zadní straně desky po 60 minutách



Obr. 47 Degradace po 63 minutách

Vyhodnocení:

K degradaci na zadní straně desky došlo po 63 minutách, což je o 39 minut déle než tomu bylo u desky bez geopolymerní směsi. Směs brání vzplanutí, tudíž se degradace projevuje zuhelnatěním.

5 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo testování geopolymerních směsí jako izolační a ochranné složky při aplikaci na dřevo. Byly testovány vzorky různých hlinito-křemičitanových surovin pro geopolymeraci. Vzorky byly tepelně zatěžovány plamenem z plynové pájecí lampy a současně byl měřen čas, za který došlo k tepelné degradaci dřevní hmoty.

Během přípravy vzorků vyšlo najevo, že suroviny typu HT-Sil, Glass-Flakes, Mikrosil – T060 a částečně i Siloxid se pro aplikaci na dřevěné plochy nehodí. Celkem byly testovány tři druhy geopolymerních směsí, aplikovaných na tři typy dřev.

Z naměřených hodnot lze říci, že u dubových a smrkových desek bylo dosaženo prodloužení doby vedoucí k tepelné degradaci o více než 30 minut, zatímco u dřevotřískových desek bylo prodloužení doby v průměru o 15 minut, což je ovšem dáno i o 10mm menší tloušťkou dřevotřískových desek oproti dubovým či smrkovým.

Z testovaných směsí nejlépe vyšla směs obsahující 20 % popílku K6 a 2 % zkrácených skelných vláken, kdy při použití s dřevotřískou bylo naměřeno prodloužení doby o 20 minut, při použití se smrkem o 44 minut a při použití s dubem o 48 minut.

U druhé testované směsi, která obsahovala 60 % skleněné drtě, bylo naměřeno prodloužení doby vedoucí k tepelné degradaci o 18 minut u dřevotřísek, o 39 minut u smrku a o 40 minut u dubu.

Směsi obsahující 30 % siloxidu se povedlo aplikovat pouze na desky z dřevotřísky a prodloužení doby je u ní o 17 minut.

Z výsledků můžeme tedy usoudit, že geopolymerní směsi vykazují dobré vlastnosti jako požární ochrana dřeva. Nicméně výroba a komplikovaná aplikace zatím znemožňují nějaké širší uplatnění v praktickém využití. Problematika této práce bude vyžadovat ještě další výzkum.

6 Seznam použité literatury

1. Česká společnost pro výzkum a použití jílu, informátor č.37 [online].[cit.2011-12-25].
Dostupné na www: <http://www.czechclaygroup.cz/>
2. Della M. Roy: Alkali-activated cements, Opportunities and challenges, *Cement and Concrete Research*, The Pennsylvania State University 1998, no.29, , pp. 249-254
3. Machovský, T.: Testování relativity surovin pro geopolymery, Diplomová práce, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně FT, 2009
4. Slavík, R., Bednařík, V., Vondruška, M.: Geopolymery a jejich použití pro nakládání s odpady [online] [cit.2011-12-23]. Dostupné na www: http://odpadysevis.ihned.cz/c4-10066110-18251200-E00000_d-geopolymery-a-jejich-pouziti-pro-nakladani-s-odpady
5. Geopolymer Valley: Nitky směřují do České republiky [online] [cit.2011-12-23]. Dostupné na www: <http://technik.ihned.cz/c1-21783300-geopolymer-valley-nitky-smeruji-do-ceske-republiky>
6. Červinka, J.: Geopolymery- Využití pro restaurování kamene a souvisejících materiálů, Bakalářská práce, Pardubice FR, 2008
7. Melar, J.: Studium polykondenzace křemičitanu s hydroxohlinitanem ve vodném prostředí, Diplomová práce, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Zlín 2008
8. Solík, J.: Studium možností přípravy syntetických pískovců, Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, Brno 2010
9. Geopolymer Institute: Binders and composites. [online] [cit.2011-12-18]. Dostupné na www: <http://www.geopolymer.org/science/ceramics-binders-and-composites>
10. Huřa, J.: Příprava a vlastnosti geopolymérů na bázi metakaolinu alkalickou aktivací, Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Brno 2005
11. Buchwald, A., Weil, M., Dombrowsky, K.: Evaluation of primary and secondary materials under technical, ecological and economic aspects for the use as raw materials in geopolymeric binders. 2005 [online] [cit.2011-12-17] Dostupné na www: : <http://www.uni-weimar.de/projekte/geton/Downloads/BrnoAB.pdf>

12. Petrografie – učební texty. [online] [cit.2011-12-23]. Dostupný z www: :
<http://petrol.sci.muni.cz/Technolitologie/skripta/cesky/Technolitologie-skripta.htm>
13. Antoř, P., Burian, A.: Vodní sklo. Výroba, struktura, vlastnosti a použití. SILCHEM spol. s r.o. Ustí nad Labem - Neštětice 2002, s.45-47.
14. Melar, J.: Studium polykondenzace křemičitanu s hydroxylitanem ve vodném roztoku, Diplomová práce, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Zlín 2008
15. Hořlavost dřeva a jeho ochrana proti ohni [online] [cit.2011-12-18]. Dostupné na www: http://drevari.humlak.cz/data_web/Data_skola/HUdreva/12.pdf